

ESTIMATIVA AUTOMÁTICA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO: INCERTEZAS E SENSIBILIDADE DO ALGORITMO SEBAL

Elisa de Mello Kich¹ & Anderson Ruhoff² & Ayan Santos Fleischmann³

Resumo – A evapotranspiração (ET) ainda é um dos componentes menos compreendidos do ciclo hidrológico, principalmente em grandes áreas. Ferramentas de sensoriamento remoto vêm se mostrando eficazes no auxílio ao entendimento dos processos espaciais que envolvem a ET. O SEBAL é um método baseado no resíduo do balanço de energia que utiliza sensoriamento remoto para estimar a ET. Embora bastante difundido, ainda não é totalmente automatizado, dependendo que o usuário determine os parâmetros para sua calibração interna. Allen *et al.* (2013) propõem uma automatização da escolha dos pixels âncora a partir da média de cada um dos extremos das imagens de temperatura de superfície (Ts) e do índice de vegetação (NDVI). São porcentagens dos pixels mais e menos vegetados e mais e menos quentes que caracterizam esses valores extremos. Atualmente essa metodologia foi ajustada para áreas agrícolas (Allen *et al.*, 2013). O presente trabalho se propôs a analisar essas porcentagens aplicando o SEBAL em uma área com uso do solo heterogêneo. Os resultados mostraram ser necessário um estudo mais completo a respeito das porcentagens de NDVI e Ts a serem utilizadas para definição dos pixels âncoras. Como sugestão futura, é que seja testada uma metodologia de calibração automática para a escolha desses pixels.

Palavras-Chave – Pixels âncora, automatização, calibração.

AUTOMATIC ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION WITH REMOTE SENSING: UNCERTAINTY AND SENSIBILITY FROM SEBAL ALGORITHM

Abstract – The evapotranspiration (ET) still is one of the less comprehended components of the hydrological cycle, mostly for big areas. Remote Sensing tools have been effective to help understand the spatial processes that involve ET. SEBAL is a method based on the energy balance budget that uses multispectral and thermal images to estimate ET. Although quite widespread, it is not completely automated, depending on the user to define the calibration parameters for its internal calibration. Allen *et al.* (2013) proposed to automate the anchor pixels selection by choosing extreme an average value of the NDVI and surface temperature. These are percentages of the more and less vegetated pixels and colder and hotter pixels that characterize the extremes, however currently this is only applied and tested over agricultural areas (Allen *et al.*, 2013). This work proposes to change this percentages by applying SEBAL in a heterogeneous area. Results show that is required a more complete study about the NDVI and Ts percentages used to define the anchor pixels. A suggestion for future research is to test an automated calibration methodology to choose these pixels.

Keywords – Anchor pixels, automation, calibration.

1. INTRODUÇÃO

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. Email: elisa.kich@gmail.com. Autor correspondente.

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. Email: anderson.ruhoff@ufrgs.br.

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. Email: ayan.fleischmann@gmail.com.

A evapotranspiração (ET) é responsável pelo transporte de grandes volumes de água da superfície para a atmosfera, mesmo assim, ainda é um dos componentes menos compreendidos do ciclo hidrológico (LI *et al.* 2009). As maneiras tradicionais de medir ou estimar ET são pontuais e consequentemente não representativas em escalas regionais em função da heterogeneidade da superfície. A utilização de dados de sensoriamento remoto, portanto, se apresenta como uma alternativa para estimar essa componente (BIGGS *et al.* 2015; COURALT *et al.* 2005).

O modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) foi desenvolvido por Bastiaanssen *et al.* (1998a) para estimar o fluxo de calor latente (LE) e ET com base no resíduo do balanço de energia utilizando imagens termais e espectrais e alguns dados climatológicos de apoio. Este método requer um processo de calibração interna para definição do calor sensível, para o qual o usuário deve selecionar dois pixels (pixels âncora) que representem condições extremas de evapotranspiração para cada imagem. O pixel frio costuma ser um local bem irrigado e com muita vegetação, enquanto o pixel quente deve ser seco e com solo descoberto.

Apesar de ter sido validado e por ser amplamente utilizado para diferentes condições climáticas e sistemas de sensores remotos (SILVA *et al.* 2015; RUHOFF, 2011; ZHANG *et al.* 2011; BASTIAANSSEN *et al.* 1998b), o processo de calibração interna do SEBAL ainda não foi completamente automatizado pois requer a interferência do usuário no processamento de cada imagem na escolha dos pixels âncora. Isso dificulta a geração de séries históricas assim como a repetibilidade dos resultados (ALLEN *et al.* 2013). De forma que mesmo que dois usuários treinados apliquem o modelo para a mesma imagem, os resultados serão diferentes, pois o SEBAL é extremamente sensível a esta escolha (ALLEN *et al.* 2013; CHORAGUIDI, 2011).

Sendo assim, Allen *et al.* (2013) propuseram uma maneira de estabelecer os pixels âncora a partir do índice de vegetação (NDVI) e da temperatura de superfície (Ts), extraíndo a média dos valores extremos desses parâmetros. A delimitação é dada a partir de porcentagens dos valores extremos de NDVI e Ts, entretanto, o estudo é direcionado para áreas em que o uso do solo é exclusivo para agricultura. Assim, os valores de porcentagens sugeridos pelos autores, quando aplicados a áreas mais heterogêneas, não necessariamente imprimem bons resultados.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar, para uma mesma série temporal de imagens, as estimativas obtidas com diferentes porcentagens além das sugeridas por Allen *et al.* (2013), de modo a compreender possíveis incertezas associadas à metodologia do SEBAL.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo pertence à região do Médio Araguaia (MMA, 2009), correspondente à parte setentrional da Ilha do Bananal (**Figura 1**), uma região do ecótono Amazônia-Cerrado, onde contrastantes usos de solo e vegetação existem, desde fisionomias características típicas do cerrado (cerradão, cerrado, campo cerrado, campo sujo de cerrado e campo limpo) até vegetação florestal amazônica e zonas de agricultura. A região possui precipitação anual em torno de 1700 mm, sendo o período de estiagem entre os meses de junho a agosto, nos quais os totais pluviométricos mensais são inferiores a 10 mm (MMA, 2009). A Ilha do Bananal está localizada no Rio Araguaia, sendo formada pelo Araguaia e o Braço Menor do Araguaia (rio Javaés). No ponto em que os rios Javaés e Araguaia se reencontram (delta do Javaés) está localizado o Parque Estadual do Cantão, composto por grandes áreas sazonalmente inundáveis e onde está instalada uma torre micrometeorológica (latitude 9°49'16,1''S e longitude 50°08'55,3''W) para medição dos fluxos de energia desde 2002 pelo projeto LBA (Borma *et al.* 2009).

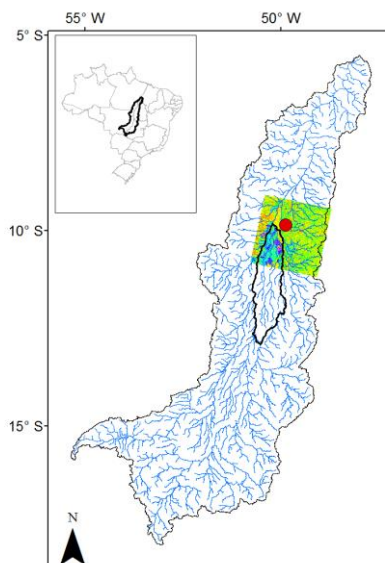


Figura 1 – Localização da Bacia do Rio Araguaia no Brasil, com destaque à Ilha do Bananal (polígono preto no centro da bacia) e imagem órbita-ponto 223-67, utilizada neste estudo para estimativa de evapotranspiração. O círculo em vermelho indica a localização da torre micrometeorológica utilizada no estudo.

2.2 Imagens Landsat e CERES

Os dados de entrada do algoritmo SEBAL são imagens multiespectrais e termal do satélite Landsat 5 sensor TM (Thematic Mapper) obtidas do site Earth Explorer da USGS. Foram selecionadas 21 imagens para a área de estudo (órbita ponto 223-067), para o período de 2004-2006. Foram utilizadas as bandas de 1 a 5 e 7, que representam o espectro visível e infravermelho, e a banda 6, que descreve a faixa termal. As informações de radiação diária utilizadas para transformar ET instantânea em ET diária foram obtidas do programa CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) da NASA, que coleta informações a partir de três satélites diferentes e fornece dados de reflectância solar e radiação emitida pela terra no topo da atmosfera (Wielicki *et al*, 2009), além de dados de radiação de ondas curtas e longas observadas na torre micrometeorológica.

2.3 Algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*)

O SEBAL é descrito com base no balanço de energia, calculado pela (1, em que o fluxo de calor sensível é o resíduo. Este é então convertido em evapotranspiração.

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

em que R_n é o saldo líquido de radiação incidente (W/m^2), G é o fluxo de calor no solo (W/m^2) e H é o fluxo de calor sensível (W/m^2).

O saldo líquido de radiação incidente pode ser obtido a partir da (2).

$$R_n = (1 - \alpha)Rs_{down} + RL_{down} - RL_{up} - (1 - \epsilon_0)RL_{down} \quad (2)$$

em que, α é o albedo, Rs_{down} é a radiação de ondas curtas incidente, RL_{up} é a radiação de ondas longas refletida, ϵ_0 é a emissividade de superfície e RL_{down} é a radiação de ondas longas incidente.

O fluxo de calor no solo pode ser estimado pela (3, desenvolvida por Bastiaanssen (2000).

$$G = \frac{Rn * (T_s - 273,15)}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) * (1 - 0,98NDVI^4) \quad (3)$$

em que T_s é a temperatura de superfície (°C) e α o albedo.

O fluxo de calor sensível é taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução em função de uma diferença de temperatura. Pode ser calculado a partir da (4).

$$H = \frac{\rho * c_p * dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

em que H é o fluxo de calor sensível (W/m^2), ρ é a densidade do ar (kg/m^3), c_p é o calor específico do ar ($1004 J/kg/K$), dT é a diferença de temperatura ($T_1 - T_2$) entre duas alturas ($z_1 - z_2$) e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s/m). A resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}) é primeiramente calculada ((5) para condições atmosféricas estáveis, em seguida é iniciado o processo iterativo que faz os cálculos levando em conta as condições atmosféricas não necessariamente estáveis.

$$r_{ah} = \frac{\ln(\frac{z_2}{z_1})}{u_* * k} \quad (5)$$

em que, z_1 e z_2 são alturas (m) da vegetação, u_* é a velocidade de fricção (m/s), e k é a constante de von Karman's (0,41).

Nesta etapa é necessário que sejam escolhidos os pixels âncora para o processo de calibração interna. Para o presente trabalho, a escolha foi realizada com base no trabalho de Allen *et al.* (2013), que utiliza o índice de vegetação NDVI e a temperatura de superfície. Para a escolha do pixel frio, são selecionados 20% dos pixels mais vegetados, dos quais se seleciona os 5% mais frios o valor médio de temperatura desse último grupo deve ser a temperatura do pixel frio. O processo se repete para a escolha do pixel quente, selecionando 20% dos pixels menos vegetados e desses, 10% dos mais quentes o valor médio de temperatura desse último grupo deve ser a temperatura do pixel quente.

Os testes foram aplicados às porcentagens originais do trabalho de Allen *et al.* (2013) (Grupo 1), e também para 25% (Grupo 2) e 50% (Grupo 3) desses valores (**Tabela 1**).

Tabela 1 – Porcentagens utilizadas na seleção automática dos pixels âncora

Grupo	Pixel frio		Pixel quente	
	NDVI	Ts	NDVI	Ts
1	5%	20%	10%	20%
2	3,75%	15%	7,5%	15%
3	2, 5%	10%	5%	10%

Uma vez escolhidos os pixels frio e quente, a diferença de temperatura entre duas alturas próximas à superfície pode ser calculada com os valores iniciais de r_{ah} obtidos pela (5). Rearranjando a (4) calcula-se dT para os pixels frio e quente, como mostra a (6).

$$dT_{frio} = \frac{H_{frio} * r_{ah}}{\rho_{frio} * C_p} \quad (6) \quad \text{em que}$$

, r_{ah} é o valor obtido na (5), ρ_{frio} é a densidade do ar no pixel frio, C_p é o calor específico do ar (1004 J/kg/K) e H_{frio} é o calor sensível, que no pixel frio é inicialmente estimado como zero. Essa determinação inicial é feita assumindo-se que, no pixel frio, toda a energia disponível está sendo usada para a mudança de estado físico da água de líquido para vapor. O cálculo de dT para o pixel quente é realizado com as mesmas equações apresentadas para o pixel frio, com a diferença de que H_{quente} é estimado por meio da (7).

$$H_{quente} = Rn_{quente} - G_{quente} \quad (7) \quad \text{em}$$

que Rn é o saldo de radiação para o pixel seco, G é o fluxo de calor no solo no pixel seco. LE é zero, pois se assume que na ausência de água, toda a energia disponível é utilizada para a mudança da temperatura do ar. Para o cálculo de dT para todos os pixels, assume-se uma relação linear entre dT e T_s . Sendo assim, ajusta-se a (8) para os pixels quente e frio de forma que possam ser obtidos os parâmetros a e b , dessa forma, esta equação pode ser aplicada para todos os pixels da imagem

$$dT = b + aT_s \quad (8)$$

Assim, calcula-se um novo H para toda a imagem, com o qual se calculam novos valores de r_{ah} e o processo se repete sucessivamente até que os valores de r_{ah} e dT no pixel quente se estabilizem. Uma vez obtidos todos os elementos da equação do balanço de energia, o fluxo de calor latente pode ser finalmente computado e transformado em evapotranspiração pela (9).

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (9)$$

em que, ET_{inst} é a evapotranspiração instantânea (mm/hr), LE é o fluxo de calor latente (W/m^2), 3600 é a conversão de segundos para horas e λ é o calor latente de vaporização da água (J/kg).

Os cálculos descritos foram realizados a partir de um script no software Matlab®, que necessita como dados de entrada as bandas multiespectrais e termal, arquivo de metadados das imagens, velocidade do vento medida na estação climatológica mais próxima no momento da captura das imagens, além de informações sobre a torre micrometeorológica como altura de medição dos dados e altura da vegetação no seu entorno e por fim, as porcentagens escolhidas para a escolha automática dos pixels âncora.

2.4 Evapotranspiração diária

A evapotranspiração diária foi obtida de duas formas, como uma função do Rn diário observado na torre e como uma função do Rn diário dos dados CERES. Isso é possível pois a partir de LE , Rn e G , calcula-se a fração evaporativa (FE) ((10), que é assumida como constante ao longo do dia, servindo, portanto, como referência para o cálculo de ET diária.

$$FE = \frac{LE}{(Rn - G)} \quad (10)$$

Em que FE é a fração evaporativa, Rn é o saldo líquido de radiação incidente (W/m^2) e G é o fluxo de calor no solo (W/m^2). Para converter FE em ET diária, aplica-se a (11).

$$ET_{24h} = 0,0864 * FE * \frac{Rn_{24h}}{\lambda} \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparação com dados da torre micrometeorológica

As **Figura 2 a 6** apresentam as comparações entre valores de H, LE, balanço energético e ET diária para estimativa com SEBAL (a partir dos dados de radiação diária da torre e radiação diária CERES), para os três grupos de pixels âncora. De forma geral, no gráfico de H calculado pelo SEBAL comparado com os dados de H medidos na torre, os pontos aproximam-se mais da reta 1:1 à medida que as porcentagens diminuem, sugerindo que, quanto menor o número de pixels que compõe a média de valores extremos de NDVI e Ts, mais precisos parecem ser os resultados para o fluxo de calor sensível. Esse mesmo fenômeno parece ocorrer também, mas de forma muito mais reduzida para o LE, uma vez que a maior componente do balanço, o Rn, acaba amenizando esse efeito. A mesma explicação é válida para ET, por ser um subproduto direto de LE.

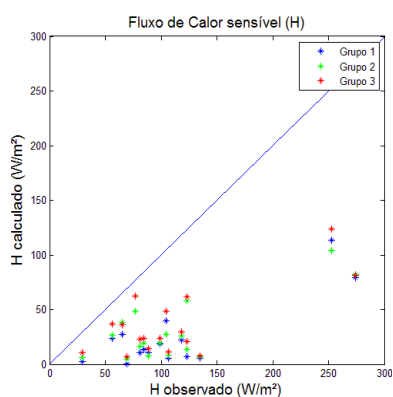


Figura 2 – Valores de H observado e H calculado.

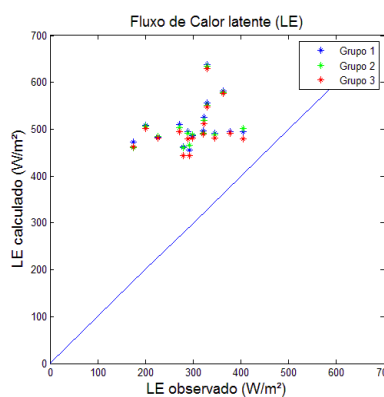


Figura 3 – Valores de LE observado e LE calculado.

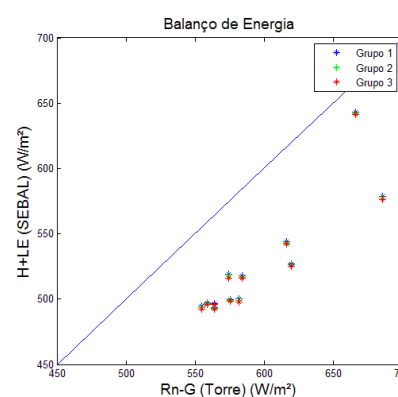


Figura 4 – Resultados do balanço de energia calculados e obtidos na torre.

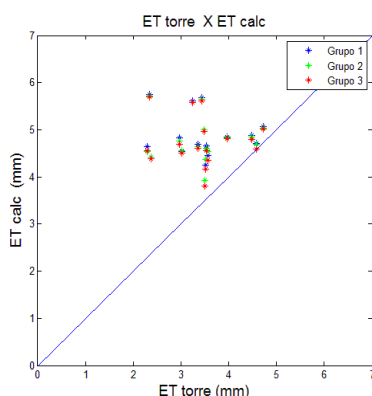


Figura 5 – Valores de ET diária observada e estimada com base em dados de Rn observados.

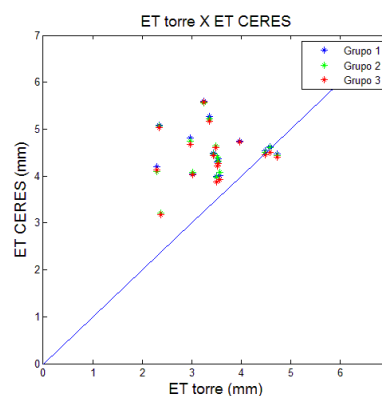


Figura 6 – Valores de ET diária observada e estimada com base em dados de Rn CERES.

O balanço de energia estimado pelo SEBAL mostrou-se subestimado em relação ao balanço de energia observado na torre. O gráfico da **Figura 4**, embora não apresente variação entre os grupos, mostra que os valores de Rn diários da missão CERES representam uma boa alternativa para o cálculo da ET diária quando o estudo for aplicado em alguma região em que não existam dados de Rn de torre micrometeorológica.

3.2 Variação dos resultados médios na área de estudo

A análise da seção anterior mostra o comportamento da variação dos parâmetros em relação à localização da torre apenas. A fim de entender como os valores dos parâmetros variam em toda a região de estudo, foram extraídas as médias de cada imagem com as quais gerou-se os gráficos da Erro! Fonte de referência não encontrada.. Observa-se que a média dos valores de cada um dos parâmetros varia à medida que as porcentagens de escolha dos pixels muda (para os grupos 1,2 e 3), permitindo inferir que diferentes escolhas das porcentagens para a definição automática dos pixels âncora interfere ligeiramente nos resultados da imagem como um todo. Erro! Fonte de referência não encontrada. – Comparação das médias dos três grupos de parâmetros nas estimativas de dT, H, LE e ET diária (obtida a partir de dados de radiação observados na torre micrometeorológica e a partir de dados de radiação CERES) para toda área de estudo das 21 imagens utilizadas.

Observando os gráficos, percebe-se que a distribuição dos valores de cada um dos parâmetros varia à medida que as porcentagens de escolha dos pixels muda (para os Grupos 1,2 e 3). Isto permite inferir que diferentes escolhas das porcentagens para a definição automática dos pixels âncora interfere ligeiramente nos resultados da imagem como um todo.

4. CONCLUSÃO

Embora o método de escolha automática dos pixels âncora proposto por Allen *et al.* (2013) seja uma alternativa interessante para eximir a necessidade de interferência do usuário na aplicação do SEBAL, os parâmetros propostos devem ser melhor estudados quando o intuito da pesquisa for uma área heterogênea e não apenas com uso para agricultura. Para trabalhos futuros, uma calibração automática pode auxiliar na a escolha das porcentagens utilizadas para a definição dos pixels âncora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN RG, BURNETT B, KRAMBER W. (2013). *Automated calibration of the METRIC-Landsat evapotranspiration process*. J Am Water Resour Assoc. 49(3):563-576. doi:10.1111/jawr.12056. 2013.
- BASTIAANSSEN, W. G. M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J., ROERINK, G. J., e VAN DER WAL, T. (1998b). *The surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2: Validation*. J. Hydrol., 212– 213, 213–229.
- BASTIAANSSEN, W.G.M., MENENTI, M., FEDDES, R.A., HOLTSLAG, A.A.M. (1998a). *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation*. J. Hydrol. 212-213, 198–212.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. (2000). *SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey*. Journal of Hydrology, 229(1), 87–100.
- BIGGS T. et al. (2015). Remote Sensing of Evapotranspiration from Cropland. Remote Sensing of Water Resources, Disasters, and Urban Studies.
- BORMA, L.; et al., (2009). *Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain Forest in the Bananal Island region, Amazonia*. Journal of Geophysical Research 114, pp.1-12.
- CHORAGUDI, R. (2011). *Sensitivity analysis on Mapping EvapoTranspiration at High Resolution Using Internal Calibration (METRIC)*. 2001; M.Sc. Thes. The Graduate College at the University of Nebraska.

LI, Z.-L., TANG, R., WAN, Z., BI, Y., ZHOU, C., TANG, B., YAN, G., & ZHANG, X. (2009). *A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. Sensors*, 9(5), 3801–3853.

RUHOFF, A. L. (2011). *Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais*. 166 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, B et al. (2015). *Estimativa da evapotranspiração real diária para a microbacia do rio das Lontras utilizando algoritmo SEBAL e imagens Landsat 8*. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. (1):6381-6388. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

WIELICKI, B.A. et al. (1998) *Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): algorithm overview*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v 36(4), pp. 1127-1141.

ZHANG X, WU J, WU H, LI Y. *Simplified SEBAL method for estimating vast areal evapotranspiration with MODIS data*. Water Sci Eng. 4(1):24-35. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2011.01.003. 2011.